

Е. В. Брусницына*, В. И. Гроховский

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

**jeka_bru@list.ru,*

Научный руководитель – проф., канд. техн. наук *В. И. Гроховский*

ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ МЕТЕОРИТА ЧЕЛЯБИНСК ПО СТРУКТУРЕ ЗОНАЛЬНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

В данной работе исследовалась структура металлических включений восьми фрагментов метеорита Челябинск (обыкновенный хондрит, тип LL5 S4 W0) со слабо деформированной светлой литологией. Обнаружены различные особенности фазового и структурного состава, которые свидетельствуют о повторном нагреве некоторых металлических частиц.

Ключевые слова: метеорит Челябинск, сплавы Fe–Ni, зональные частицы.

Е. V. Brusnitsyna, V. I. Grokhovskiy

ASSESSMENT OF THERMAL HISTORY METEORITE CHELYABINSK ON THE STRUCTURE OF AREA METAL PARTICLES

Metallic structures in fragment of the Chelyabinsk meteorite (ordinary chondrite LL5 S4 W0) with slightly shocked light lithology were studied. Different phases and structures are present. We detected the signatures of reheat in some metallic particles.

Keywords: Chelyabinsk meteorite, Fe-Ni alloys, zoned particles.

Метеорит Челябинск относится к обыкновенным хондритам, тип LL5. Это каменный метеорит с силикатной матрицей, включениями металла и сульфидов железа. Подробный состав описан в сборнике [1]. В отличие от других хондритов, вещество метеорита Челябинск состоит из нескольких визуально различимых структурных типов – *литологий* [2]. В зависимости от степени метаморфизма различают слабо деформированную светлую и ударно-переплавленную темную области. В темной области присутствуют две зоны – серая с переплавленными силикатами и черная с переплавленными сульфидами [3]. Наличие подобных зон свидетельствует о том, что в космической истории родительского тела происходили ударные события, возможно, ставшие причиной частичного или полного переплава исходной структуры.

Наибольший интерес представляют фрагменты со светлой литологией, поскольку в большей степени соответствуют исходному веществу родительского тела. Изучение структуры металлических

включений позволяет выявить наличие нагрева и определить температуру этого нагрева, опираясь на диаграмму состояния Fe–Ni [4].

Как известно, при чрезвычайно медленном охлаждении порядка нескольких градусов в миллион лет ниже температуры 400 °С в метеоритном сплаве Fe–Ni образуются зоны, которые сформировались в результате различных превращений: зона с упорядоченной структурой FeNi; двухфазная область, так называемая облачная зона FeNi+ α_2 -Fe(Ni), как результат спинодального распада, и участки с мартенситовидной структурой α_2 -Fe(Ni) [5]. В каменных метеоритах такой процесс приводит к образованию высоконикелевых зональных частиц. Зональность этих частиц может быть нарушена последующим нагревом. Целью данной работы являлось изучение микроструктуры металлических частиц из светлой литологии метеорита Челябинск и выявление фазовых и структурных различий.

Для исследования были отобраны восемь фрагментов метеорита Челябинск со светлой литологией из коллекции Метеоритной экспедиции УрФУ. После распила поверхность образцов готовилась по стандартной металлографической методике. В качестве травителя использовался 2%-й раствор азотной кислоты в спирте. Исследования микроструктуры проводились на оптическом микроскопе *Axiovert 40 MAT*.

Металлические частицы исследуемых фрагментов имеют различный фазовый и структурный состав: камасит α -Fe(Ni), тэнит γ -Fe(Ni) и тетратэнит – упорядоченная γ -фаза FeNi, зональный тэнит, плессит (α Fe(Ni) + γ -Fe(Ni)), мартенситоподобные структуры α_2 -Fe(Ni), линии Неймана в камасите, поликристаллический камасит, двойники роста в γ -фазе. Характеристика исследуемых объектов, особенности их микроструктуры и предположения о возможном нагреве представлены в таблице.

Зональные частицы в «чистом виде» наблюдались лишь в одном фрагменте – № 1, рис. 1. В этом же фрагменте ранее обнаружен минерал хаксонит [6] и игольчатый мартенсит, последний довольно часто встречается в искусственных сплавах железо – никель – углерод. Для этой частицы ранее по продуктам спинодального распада определена скорость охлаждения металлических частиц в веществе родительского тела ниже 400 °С, которая составила порядка 5 °С/млн лет [6].

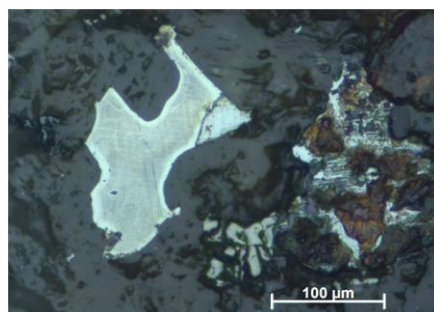


Рис. 1. Типичная зональная частица во фрагменте H1 метеорита Челябинск

Характеристики исследуемых фрагментов светлой литологии метеорита
Челябинск LL5

№ п/п	№ в коллек- ции УрФУ	Вес, г	Особенности микроструктуры	Наличие зональных частиц	Повто рный нагрев
1	<i>H1</i>	4,3	Зональные частицы, хаксонит (Fe, Ni) ₂₃ C ₆ , игольчатый мартенсит, линии Неймана в камасите	+	–
2	<i>A26</i>	5,2	Зональные частицы в центральной части содержат иглы мартенситовидной структуры	+	+
3	<i>VG2a</i>	4,6	Зональные частицы с зернистым плесситом, выделения микрографической меди, поликристаллический камасит, линии Неймана	+	+
4	<i>VG9b</i>	4,3	Зональные частицы с зернистым плесситом, на границе с силикатной матрицей выделения камасита, поликристаллический камасит, линии Неймана	+	+
5	<i>ChB1.2.1</i>	14,8	Поликристаллический камасит, мартенситоподобная структура в высоконикелевых частицах	–	+
6	<i>D1</i>	4,3	Мартенситоподобные структуры	–	+
7	<i>TK1</i>	46,3	Поликристаллические частицы рекристаллизованного металла, иглы мартенситовидной структуры	–	+
8	<i>Br1</i>	14,9	Поликристаллический камасит, иглы мартенситовидной структуры, двойники роста в γ -фазе	–	+

Ряд исследуемых фрагментов также содержит зональные частицы, но с вероятно возможным нагревом, например, во фрагменте № 4 (рис. 2, *a*) в центральной части металлических зерен наблюдается сильно травящаяся мелкодисперсная структура – плессит ($\alpha+\gamma$), в которой видны границы зерен. Структура «зернистого плессита» присутствует также во фрагменте № 3. Края металлических частиц (рис. 2, *a*) обрамлены поликристаллическим камаситом (α -фаза), который, вероятно, образовался в результате рекристаллизации при нагреве. Рис. 2, *б* (фрагмент № 2) демонстрирует металлическую частицу, напоминающую зональную, с ярко выраженными мартенситовидными иглами в ее центральной части. Такая структура могла образоваться при нагреве в γ -область части металлического зерна и быстрого охлаждения.

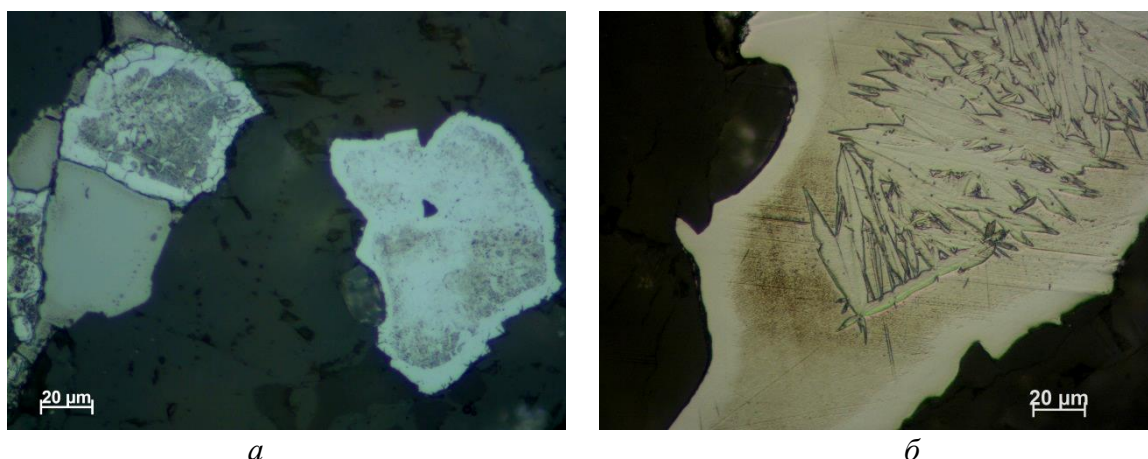


Рис. 2. Металлические частицы: *а* – фрагмент *VG9b*, центральные части – «зернистый плессит», по краям – поликристаллический камасит; *б* – фрагмент *A26*, мартенситовидные иглы в центральной части

Металлографические исследования фрагментов № 5–8 не выявили наличия зональных частиц. Во всех фрагментах этой группы присутствуют мартенситоподобные структуры, различные по морфологии (рис. 3), которые можно разделить на два типа: 1) расположенные по краям зерна (рис. 3 *а*); 2) игловидные в центральной части зерна (рис. 2, *б*) и зародившиеся на включениях троилита (FeS). Структуры типа 1 встречаются во фрагментах № 5 и 6, типа 2 – в № 7 и 8. Также для всех фрагментов № 5–8 характерными являются частицы рекристаллизованного металла, со структурой поликристаллического камасита. В фрагменте № 7 были обнаружены поликристаллические металлические частицы с выделениями по границам зерен, вероятнее всего, образование выделений проходило после повторного нагрева по следующему механизму: $\alpha_2 \rightarrow \alpha + \gamma$. Кроме того, во фрагменте № 8 присутствуют несколько металлических частиц с двойниками роста в γ -фазе.

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что металлическая часть исходного вещества родительского тела охлаждалась со скоростью порядка $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{млн лет}$ ниже температуры $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ и затем в результате возможного ударного события, претерпела повторный нагрев до различных температур. По структурному составу и, следовательно, по степени нагрева исследуемые фрагменты можно разделить на два типа: 1) содержащие зональные металлические частицы и 2) не содержащие зональные частицы. Таким образом, некоторые участки с металлическими частицами в светлой литологии нагревались выше $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, что привело к нарушению зональности частиц по никелю. Часть вещества светлой литологии, вероятнее всего, была нагрета слабо, до температур, не превышающих $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом успели пройти процессы рекристаллизации, но это не привело к полному исчезновению зональных частиц.

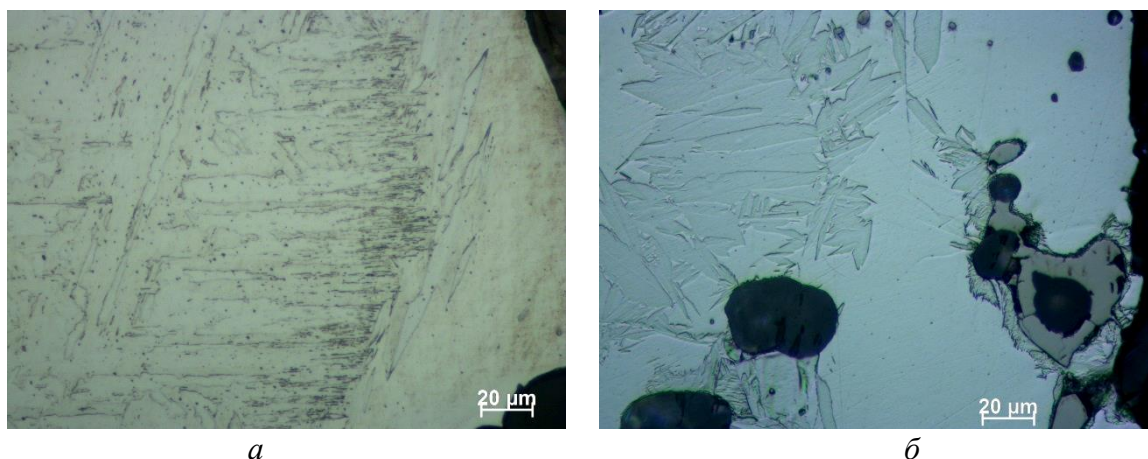


Рис. 3. Мартенситоподобные структуры в фрагментах: *а* – D1 и *б* – ТК

В данной работе исследовались особенности строения металлических частиц во фрагментах метеорита Челябинск со светлой литологией. Установлена различная степень термической обработки металлических частиц. Повторный нагрев приводит к разрушению зональности металлических частиц и может быть смоделирован в лабораторных условиях.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 15-35-21164 мол_а_вед. и № 16-38-00532 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрография, минералогия и строение метеорита Челябинск. Метеорит Челябинск – год на Земле: материалы Всероссийской научной конференции. Челябинск, 2014. С. 694.
2. Chelyabinsk Meteorite: Shock Metamorphism, Black Veins and Impact Melt Dikes, and the Hugoniot / D. D. Badyukov [et al.] // Petrology. 2015. V. 23. P. 103–115.
3. Physical properties, structure and fracturing of the Chelyabinsk LL5 meteorite body / V. I. Grokhovsky [et al.] // Meteorit. & Planet. Sci. 2014. V. 49. P. 5364
4. Yang C.-W., Williams D.B., Goldstein J.I. A revision of the Fe–Ni phase diagram at low temperature // J. Phase Equil. 1996. V. 17. P. 522–531.
5. Thermal history of IVA iron meteorites from transmission electron microscopy of the cloudy zone microstructure / J.I. Goldstein [et al.] // Meteorit. Planet. Sci. 2009. V. 44. P. 343–358.
6. Grokhovsky V. I., Brusnitsyna E. V., Yakovlev G. A. Haxonite in Chelyabinsk LL5 meteorite // Meteorit. & Planet. Sci. 2015. V. 50. P. 5272.